



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

Offenlegungsschrift
DE 196 25 830 A 1

51 Int. Cl.⁸:
G 01 B 11/16
G 01 B 9/02
G 01 J 9/02
G 01 L 1/24
G 01 N 21/45
G 02 B 27/48
G 02 B 17/00
G 02 B 27/10

21 Aktenzeichen: 196 25 830.8
22 Anmeldetag: 28. 6. 96
43 Offenlegungstag: 2. 1. 98

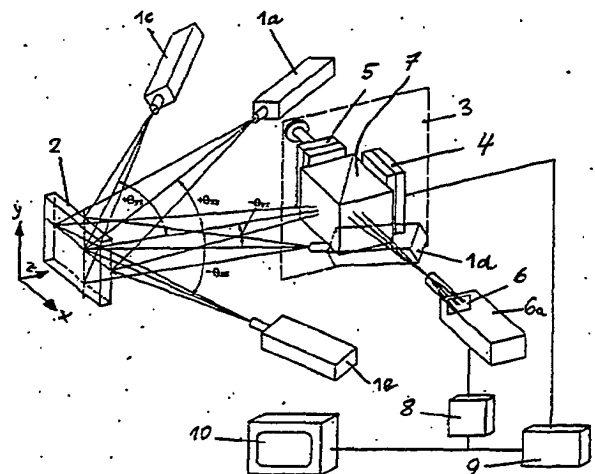
DE 196 25 830 A 1

71 Anmelder:
Steinchen, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing., 34128 Kassel,
DE
74 Vertreter:
Frhr. von Schorlemer, R., Dipl.-Phys., Pat.-Anw.,
34117 Kassel

61 Zusatz zu: P 44 46 887.3
72 Erfinder:
gleich Anmelder

64 Verfahren und Vorrichtung für die Shearing-Speckle-Interferometrie

57 Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur shearografischen Ermittlung von Ableitungen der in-plane und out-of-plane Verformungen einer Oberfläche eines Objekts (2) in wenigstens eine ausgewählte Richtung. Die Objektoberfläche wird mit kohärentem Licht bestrahlt. Das von der Objektoberfläche diffus reflektierte Licht wird mittels einer Shearing-Anordnung (3) und einer optischen Achse (z) aufweisenden optischen Systems in einer Bildebene (6) abgebildet, und von der Objektoberfläche wird wenigstens ein Null-Shearogramm und ein Belastungs-Shearogramm aufgenommen. Zur Ermittlung reiner in-plane oder out-of-plane Dehnungen wird die Objektoberfläche aus drei oder vier unterschiedlichen Richtungen ($+\Theta_{xz}$, $-\Theta_{xz}$ bzw. $+\Theta_{yz}$, $-\Theta_{yz}$) nacheinander (sequentiell) bestrahlt, wobei die reinen in-plane oder out-of-plane Anteile durch Kombination der dadurch erhaltenen Shearogramme ermittelt werden, wobei die Bestrahlung aus wenigstens drei unterschiedlichen Richtungen erfolgt, und wobei die Bestrahlung aus zwei Richtungen ($+\Theta_{xz}$, $-\Theta_{xz}$) vorzugsweise spiegelsymmetrisch zu einer gemeinsamen, die optische Achse (z) einschließenden ersten Ebene (xz) erfolgt, während die Bestrahlung aus den anderen Richtungen ($+\Theta_{yz}$, $-\Theta_{yz}$) in einer senkrecht zur ersten Ebene liegenden, die optische Achse (z) einschließenden zweiten Ebene (yz) vorgenommen wird (Fig. 9).



DE 196 25 830 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 10. 97 702 061/576

18/29

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung nach den Oberbegriffen der Ansprüche 1 und 6.

Zur Beobachtung von Objektoberflächen für die Dehnungsmessung mittels der Speckle Pattern Shearing Interferometrie, abgekürzt Shearografie, wird die zu untersuchende Oberfläche mit kohärentem Licht beleuchtet, das reflektierte Licht mittels einer Shearing-Optik, die z. B. aus einem einen Strahlteiler und zwei Spiegel aufweisenden Zweistrahlinterferometer besteht, in der Bildebene eines opto-elektronischen Sensors abgebildet und das Meßergebnis dann mittels eines an den Sensor angeschlossenen Rechners ausgewertet. Bei der Verformung des Objekts ändert sich die Lage der das Licht reflektierenden Punkte nicht nur absolut, sondern auch relativ zueinander. Das führt bei der Überlagerung der im belasteten Zustand erhaltenen Bilder, den sogenannten Belastungs-Shearogrammen, mit den im unbelasteten Zustand erhaltenen Bildern, den sogenannten Null-Shearogrammen, zu Interferenzmustern, die im Gegensatz zu holografischen Verformungsmessungen nicht ein Maß für die Verformung, sondern ein Maß für den Gradienten bzw. die Ableitung der Verformung in der Shearrichtung, d. h. in derjenigen Richtung sind, in die die Lichtstrahlen vom Shearing-Element gebrochen werden. Die erhaltenen Interferenzstreifen sind damit Linien gleicher Dehnung und nicht Linien gleicher Verformung. Bei einwandfreier Verformung des Objekts sind die erhaltenen Interferenzmuster i. a. regelmäßig. Weist das Objekt dagegen Mängel auf, ergeben sich entsprechend unterschiedliche Dehnungen, die zu deutlich sichtbaren Unregelmäßigkeiten der Interferenzmuster führen.

Shearografische Verfahren und die zu ihrem Verständnis notwendigen mathematischen Grundlagen sind dem Fachmann allgemein bekannt (DE 28 06 845 C2, DE 40 36 120 A1, Y.Y. Hung in "Shearography: A Novel and Practical Approach for Nondestructive Inspection", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 8, No. 2, 1989, S. 55—67 und Y.Y. Hung, A.J. Durelli in "Simultaneous Measurement of Three Displacement Derivatives Using a Multiple Image-Shearing Interferometric Camera", Journal of Strain Analysis, Vol. 14, No. 3, 1979, S. 81—88).

Obwohl die shearografischen Verfahren dieser Art wegen ihrer Einfachheit und Unempfindlichkeit gegen äußere Einflüsse, z. B. mechanische Schwingungen der Meßapparatur, große Vorteile bieten, weisen sie auch noch Mängel auf. Diese bestehen vor allem darin, daß nur sogenannte out-of-plane Dehnungen sichtbar gemacht werden können bzw. auswertbar sind und die zum Sichtbarmachen bzw. Messen von Dehnungen und zum Auswerten der erhaltenen Bilder verfügbaren Shearing-Elemente vergleichsweise komplexe Aufbauten der gesamten Meßapparatur zur Folge haben.

Es ist daher auch bereits bekannt geworden, in-plane Dehnungen, die von einem out-of-plane Anteil überlagert sind, sichtbar zu machen (DE 44 14 287 A1; The European Symposium on Optics for Productivity in Manufacturing, European Optical Society (EOS) und SPIE (oral presentation), 20.—24.06.94, Frankfurt/Main zum Thema "Shearography for direct Measurement of Strains" von W. Steinchen, L.X. Yang, M. Schuth, G. Kupfer; "Strains measured on plane and curved surfaces by means of the shearographic method" von W. Steinchen, M. Schuth, L.X. Yang, Journal Strain Aug. u. Nov. 1994; "Messung der Dehnungslinien auf der Oberfläche von Platten und scheibenförmigen Bauteilen mittels Shearografie" von W. Steinchen, G. Kupfer, M. Schuth, L.X. Yang, Technisches Messen, H. 6, 1994 Oberkochen).

Zur Vermeidung von Wiederholungen werden alle genannten Dokumente hiermit ausdrücklich zum Gegenstand der Offenbarung der vorliegenden Anmeldung gemacht.

Ausgehend von diesem Stand der Technik liegt dem Hauptpatent ... (Patentanmeldung P 44 46 887.3) die Aufgabe zugrunde, die verbleibenden geringen out-of-plane Anteile bei der shearografischen in-plane Dehnungsmessung vollständig zu eliminieren oder beide Anteile voneinander zu trennen, so daß eine exakte in-plane Dehnungsmessung möglich wird.

Die zur Lösung dieser Aufgabe im Hauptpatent ... (Patentanmeldung P 44 46 887.3) vorgeschlagenen Verfahren und Vorrichtungen bringen den Vorteil mit sich, daß durch den bloßen Einbau von zusätzlichen optischen Elementen in den Strahlengang der Beleuchtungs- oder Beobachtungsseite reine in-plane Dehnungen erhalten werden können und die Shearing-Optik selbst bei der Ermittlung reiner in-plane Dehnungen senkrecht zur betrachteten Objektoberfläche angeordnet werden kann. Als Nachteil wird jedoch empfunden, daß zur Ermittlung aller die in-plane und out-of plane Dehnungen betreffenden Werte zahlreiche Messungen vorgenommen werden müssen, die einerseits mehrfache Belastungsänderungen des zu untersuchenden Objekts und andererseits mehrfache Lageänderungen der beteiligten Lichtquellen, Shearing-Elemente od. dgl. erfordern.

Der vorliegenden Zusatzfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, die im Hauptpatent ... (Patentanmeldung P 44 46 887.3) vorgeschlagenen Verfahren und Vorrichtungen so weiterzubilden, daß die Zahl der vorzunehmenden Belastungs- und Lageänderungen stark reduziert werden kann.

Zur Lösung dieser Aufgabe dienen die kennzeichnenden Merkmale der Ansprüche 1 und 6.

Weitere vorteilhafte Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Die Erfindung wird nachfolgend in Verbindung mit der beiliegenden Zeichnung an Ausführungsbeispielen näher erläutert, wobei die Fig. 1 bis 8 Vorrichtungen nach dem Hauptpatent ... (Patentanmeldung P 44 46 887.3) und damit hergestellte Interferenzmuster und die Fig. 9 bis 12 Vorrichtungen nach der vorliegenden Zusatzanmeldung betreffen. Es zeigen:

Fig. 1 schematisch eine Vorrichtung zur wahlweisen Ermittlung der Ableitungen von out-of-plane und in-plane Verformungen;

Fig. 2a bis 2d bei Anwendung der Vorrichtung nach Fig. 1 jeweils im Vergleich an einer Kreisscheibe mit shearografischen Mitteln erhaltene in-plane Interferenzmuster und Fig. 2e bis 2g mit rechnerischen Lösungen erhaltene Aufnahmen für den zweiachsigen Spannungszustand, wobei die Streifenmuster der Fig. 2c und 2d bei Überlagerung die in Fig. 2g dargestellte Gleitung ergeben;

Fig. 3 schematisch eine zweite Ausführungsform einer erfindungsgemäß n Vorrichtung zur wahlweisen Ermittlung der Ableitungen von out-of-plane und in-plane Verformungen mit der Möglichkeit der Separierung

beider Anteile;

Fig. 4a und 4b mit der Vorrichtung nach Fig. 3 erhaltene, überlagerte in-plane und out-of-plane Dehnungsanteile bei in-plane Belastung eines gekröpften Zugstabs;

Fig. 4c und 4d die reinen in-plane bzw. out-of-plane Dehnungsanteile, errechnet aus den Dehnungsanteilen nach Fig. 4a und 4b;

Fig. 5a bis 5c den Fig. 4a bis 4c entsprechende Dehnungsanteile bei in-plane Belastung eines Zugstabs mit Außenkerben;

Fig. 6a bis 6d reine in-plane Terme bei in-plane Belastung eines Zugstabs mit Außenkerben;

Fig. 7a bis 7d den Fig. 6a bis 6d entsprechende Terme bei in-plane Belastung eines Zugstabs mit Mittelbohrung;

Fig. 8 eine Einrichtung zur Herstellung von Beleuchtungsstrahlen für die Vorrichtung nach Fig. 3;

Fig. 9 eine erste Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit vier Beleuchtungsstrahlen;

Fig. 10 eine zweite Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit drei Beleuchtungsstrahlen und einer verschiebbaren, aus zwei Shearing-Spiegeln gebildeten Baueinheit; und

Fig. 11 und 12 je eine dritte und vierte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit je zwei Shearing-Einheiten.

Die Vorrichtung nach Fig. 1 dient zunächst in an sich bekannter Weise zur Ermittlung der Ableitungen von in-plane Verformungen sowie der Ermittlung der out-of-plane Terme. Hierzu weist die Vorrichtung eine kohärentes Licht ausstrahlende Lichtquelle 1, vorzugsweise einen Laser, eine nicht näher dargestellte Halterung für ein zu untersuchendes Objekt 2, eine Shearing-Anordnung 3, z. B. ein Zweistrahlinterferometer mit einem Strahlteiler 7 und zwei Spiegeln 4 und 5, und eine Bildebene 6 auf, in der ein Bildaufnehmer, z. B. ein fotografischer Film, ein optoelektronischer Bildaufnehmer auf CCD-Basis oder irgendein anderer Aufzeichnungsträger zur Aufnahme und Speicherung eines fotografischen Bildes angeordnet ist. Im Ausführungsbeispiel ist ein optoelektronischer Sensor 6a in Form einer üblichen CCD-Kamera vorgesehen. Das vom optoelektronischen Sensor 6a registrierte Bild der Objektoberfläche wird als erstes Phasenbild bei im undeformierten Zustand befindlichen Objekt 2 z. B. in einem Frame-Grabber (Bildspeicher) 8 gespeichert. Das vom optoelektronischen Sensor 6a registrierte Bild des zweiten Phasenbilds bei im deformierten Zustand befindlichen Objekt 2 wird davon subtrahiert bzw. addiert. Das Ergebnis der Subtraktion bzw. Addition wird auf dem Bildschirm 10 eines Rechners dargestellt. Speicherung, Subtraktion bzw. Addition und Darstellung erfolgen jeweils pixelweise für jeden Punkt des Objekts 2. Das Bild des deformierten Objektzustands 2 wird von dem im Bildspeicher gespeicherten Bild subtrahiert bzw. addiert und auf dem Bildschirm 10 dargestellt.

Das bekannte Verfahren der Shearografie besteht darin, daß das Objekt 2 bzw. seine zu untersuchende Oberfläche zunächst im unbelasteten Zustand mit kohärentem Licht beleuchtet bzw. bestrahlt und das von dieser Oberfläche diffus reflektierte Licht in der Bildebene 6 abgebildet wird. Dabei bewirkt eine Shearing-Einheit in Form des Spiegels 5, daß ein Teil des von irgendeinem Punkt P_1 der Objektoberfläche kommenden Lichts in einem Punkt P_{11} und der restliche Teil des vom Punkt P_1 kommenden Lichts in einem Punkt P_{12} der Bildebene 6 gesammelt werden, wobei der Abstand der Punkte P_{11} und P_{12} üblicherweise als Shearabstand bezeichnet wird. Die Richtung der Verschiebung der beiden Punkte P_{11} und P_{12} , d. h. die Shearrichtung, hängt von der Lage, d. h. von der Verkippung des Shearing-Spiegels 5 ab. Eine Vershearung der Objektoberfläche in y-Richtung ergibt sich infolge Kippen des Spiegels 5 um die in Fig. 1 schematisch angedeutete z-Achse eines kartesischen Koordinatensystems, und analog wird die Vershearung der Objektoberfläche in x-Richtung infolge Kippen des Spiegels 5 um die y-Achse beobachtet. Die xy-Ebene des Koordinatensystems liegt dabei in der zu betrachtenden Oberfläche des Objekts 2. Der Shearabstand läßt sich durch die Größe des jeweiligen Kippwinkels des Planspiegels 5 einstellen. Als Shearing-Einheit kann wahlweise auch der Spiegel 4 verwendet werden.

Zur Vershearung der Objektoberfläche um einen hinsichtlich Größe und Richtung einstellbaren Kippwinkel sind vorzugsweise verstellbare Feineneßschrauben vorgesehen, so daß Shearrichtung und Shearabstand eingestellt werden können.

Für das Null-Shearogramm werden mittels eines am Spiegel 4 befestigten Piezokristalls, der über einen mit dem Rechner 10 verbundenen D/A-Wandler 9 gesteuert wird, mehrere, definiert phasenverschobene Bilder registriert. Daraus wird für jedes Pixel die Phase bestimmt. Dieses Verfahren wird dann für den deformierten Objektzustand wiederholt. Damit ist die rechnerunterstützte Auswertung der Dehnungen aus Shearogrammen möglich.

Bei den bisher üblichen shearografischen Verfahren wird das Objekt 2, hier eine planparallele Platte, in der Regel in z-Richtung mit einer Kraft $\pm F_z$ belastet, so daß sich eine der Bildebene 6 zugewandte Oberfläche in z-Richtung konvex oder konkav wölbt und eine sogenannte out-of-plane Verformung erhalten wird. Die Erzielung brauchbarer Interferenzmuster setzt hierbei voraus, daß die von der Lichtquelle 1 ausgehenden Lichtstrahlen und die senkrecht zur xy-Ebene verlaufende und z. B. in diesem Bereich mit der z-Achse zusammenfallende optische Achse des Systems im wesentlichen beide in der xz-Ebene oder einer dazu parallelen Ebene liegen und einen Winkel θ_{xz} bilden, der möglichst klein ist. Die hierbei erhaltenen Interferenzstreifen lassen sich bei Vershearung in x-Richtung als Streifen gleicher Dehnung in x-Richtung deuten. Wird der Verformungs-Vektor mit $V = u(x,y,z) + v(x,y,z) + w(x,y,z)$ bezeichnet, würden daher die Streifen ein Maß für die Größe $\partial w / \partial x$ sein. Entsprechend würde das Interferenzmuster ein Maß für die Größe $\partial w / \partial y$ liefern, wenn das Shearing-Element 5 um 90° verdreht gekippt und daher ein Bildversatz in y-Richtung herbeigeführt würde.

Dieses Beträge für die Größen $\partial w / \partial x$ und $\partial w / \partial y$ lassen sich bei der Anwendung einer Lichtquelle erhalten, deren Achse mit der z-Achse bzw. der optischen Achse einen möglichst kleinen Winkel θ_{yz} bildet und in der yz-Ebene liegt.

Demgegenüber müssen für eine in-plane Beleuchtung und in-plane Beobachtung mit der Apparatur nach Fig. 1 zumindest zwei Voraussetzungen erfüllt sein. Die erste Voraussetzung ist, daß die Winkel θ_{xz} bzw. θ_{yz}

ungleich Null sein müssen und möglichst nah bei 90° , vorzugsweise zwischen 60° und 90° liegen sollten, was mit der Vorrichtung nach Fig. 1 durch entsprechende Schwenkung der Lichtquelle 1 leicht realisierbar ist. Die zweite Voraussetzung ist dagegen, daß die auf das Objekt 2 wirkenden Kräfte so gewählt werden, daß die daraus in z-Richtung resultierenden Verformungen sehr kleine Ableitungen $\partial w/\partial x$ und $\partial w/\partial y$ aufweisen und die

5 Verformung daher hauptsächlich in der xy-Ebene, d. h. "in-plane" erfolgt. Unter diesen Voraussetzungen ergeben die mit der sonst gleichen Vorrichtung erhaltenen Interferenzmuster je nach entsprechender Kippung einer Shearing-Einheit, z. B. des Spiegels 5 der Shearing-Anordnung 3, ein Maß für $\partial u/\partial x$ und $\partial u/\partial y$, wenn die Strahlachse und die z-Achse in der xz-Ebene liegen, bzw. ein Maß für die Werte $\partial v/\partial x$ und $\partial v/\partial y$, wenn die

10 Sichtbarmachung der Ableitungen der in-plane Verformungen z. B. mittels der Kraft $\pm F_x$ eine Dehnung (oder Stauchung) des Objekts 2 in x-Richtung herbeigeführt wird. Alternativ wäre es möglich, aufgrund einer Kraft $\pm F_y$ eine Dehnung (oder Stauchung) in y-Richtung oder irgendeiner anderen Richtung innerhalb der xy-Ebene herbeizuführen.

Noch genauere Messungen der in-plane Dehnungen lassen sich erhalten, wenn berücksichtigt wird, daß der als

15 Winkelhalbierende zwischen Beleuchtungs- und Beobachtungsstrahl definierte Sensitivitätsvektor möglichst in x- oder y-Richtung erstreckt sein sollte. In praktischen Anwendungsfällen ist eine solche Lage zwar nicht erreichbar, doch ist es möglich, den Sensitivitätsvektor unter einem Winkel von z. B. ca. $20-30^\circ$ zur x- oder y-Achse und damit unter einem Winkel von ca. $70-60^\circ$ zur z-Achse anzuordnen. Für diese Fälle zeigt die Rechnung, daß in den relativen Phasenverschiebungen die Terme $\partial u/\partial x$, $\partial u/\partial y$ und entsprechend $\partial v/\partial x$ und

20 $\partial v/\partial y$ eine erheblich größere Gewichtung als die entsprechenden Terme $\partial w/\partial x$ und $\partial w/\partial y$ erhalten, so daß die überlagerten out-of-plane Anteile vergleichsweise klein werden.

Verfahren und Vorrichtungen der beschriebenen Art sind dem Fachmann grundsätzlich bekannt (z. B. DE 44 14 287 A1) und brauchen daher nicht näher erläutert werden.

Beispiele für mit einer Vorrichtung nach Fig. 1 erhaltene Interferenzmuster sind in Fig. 2 gezeigt. Dabei zeigen die Fig. 2a bis 2d die durch Messung erhaltenen Interferenzmuster einer diametral gedrückten Kreisscheibe, in der ein zweiachsiger Spannungszustand hervorgerufen wird. Der Vergleich mit den auf rechnerischem Wege ermittelten Dehnungszuständen nach Fig. 2e bis 2g zeigt gute Übereinstimmung.

Das Hauptpatent ... (Patentanmeldung P 44 46 887.3) bezweckt die geringen out-of-plane Anteile bei der shearografischen in-plane Dehnungsmessung vollständig zu eliminieren bzw. beide Anteile zu separieren, damit auch eine exakte in-plane Dehnungsmessung möglich wird. Erreicht wird dies entweder durch den bloßen

30 Einbau von optischen Elementen z. B. Polarisatoren 11 bzw. 12 (Fig. 1) in den Strahlengang der Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung oder rechnerisch bei Anwendung der Vorrichtung nach Fig. 3.

Bei der Vorrichtung nach Fig. 3 wird von dem Gedanken ausgegangen, das Objekt 2 vorzugsweise spiegelsymmetrisch aus zwei Richtungen mit zwei Beleuchtungsstrahlen 15 und 16 zu beleuchten und in diesen Strahlen

35 jeweils einen Verschuß 17 bzw. 18 anzuordnen. Dadurch ist es auf einfache Weise möglich, die Objektoberfläche durch Öffnen bzw. Schließen der Verschlüsse 17, 18 von verschiedenen Seiten her im Grund- oder Belastungszustand zu beleuchten und dann mit der Zweistrahlinterferometer-Anordnung 3 wie bei Fig. 1 phasenverschobene Shearogramme aufzunehmen. Im Unterschied zu Fig. 1 werden dabei die Shearogramme verschiedenen arithmetischen Operationen unterworfen, um die in-plane und out-of-plane Anteile durch rechnerische Methoden voneinander zu trennen. Außerdem können durch Variation der Beleuchtungseinrichtungen und der Shear-

40 richtungen die Gradienten der in-plane Verformungen in verschiedene Richtungen gebildet und zahlenmäßig dargestellt werden.

Bei der Vorrichtung nach Fig. 3 werden die beiden Beleuchtungsstrahlen 15 und 16 der Einfachheit halber durch zwei verschiedene Lichtquellen 1 und 19, insbesondere Laser, erzeugt. Im Hinblick auf Kohärenz und

45 gleiche Wellenlänge erfolgt die Erzeugung beider Strahlen 15, 16 jedoch vorzugsweise mit Hilfe derselben Lichtquelle 1, indem z. B. in den Beleuchtungsstrahl 15 ein zusätzlicher, den Strahl 16 bildender Strahlteiler eingebracht wird. Wahlweise kann auch eine einzige Lichtquelle entsprechend den vorgegebenen Positionen geschwenkt werden. Als eigentliche Lichtquellen sind daher diejenigen Bauteile (Laser, Strahlteiler od. dgl.) zu verstehen, von denen die auf das Objekt 2 treffenden Lichtstrahlen bzw. -bündel 15, 16 ausgehen.

Wie Fig. 3 zeigt, liegen die beiden Beleuchtungsstrahlen 15 und 16 auf beiden Seiten der yz-Ebene einander gegenüber, wobei die maßgeblichen Winkel mit $+\theta_{xz}$ und $-\theta_{xz}$ bezeichnet sind. Die Zweistrahlinterferometer-Anordnung 3 ist so ausgerichtet, daß sie das vom Objekt 2 reflektierte Licht beider Strahlen 15 und 16 empfängt. Die Vershearung und Phasenverschiebung erfolgen auch bei dieser Ausführungsform in bekannter Weise. Dabei wird z. B. zuerst der Verschuß 18 geschlossen und der Verschuß 17 geöffnet und das Objekt 2 im Grundzustand

50 unter dem Beleuchtungswinkel $+\theta_{xz}$ beleuchtet. Das Speckle-Interferenzbild, das diese erste Beleuchtung erzeugt, wird vom Rechner 10 mittels des Bildaufnehmers 6a, z. B. einer CCD-Kamera, gespeichert. Die Intensitätsverteilungen werden wie üblich von mehreren, um einen vorher festgelegten Winkel phasenverschobenen Shearogrammen mit der bekannten Phasenschiebetechnik gemessen, und die Phasen-Werte θ_{+1} werden für jeden Punkt des Speckle-Interferenzfeldes berechnet. Dann wird der Verschuß 17 geschlossen und der Vers-

55 schluß 18 geöffnet. Damit wird das Objekt durch den weiteren Beleuchtungsstrahl 16 unter dem Beleuchtungswinkel $-\theta_{xz}$ illuminiert und analog die Phasenverteilung θ_{-1} des durch den Beleuchtungsstrahl 16 erzeugten Speckle-Interferenzfeldes im Rechner 10 bestimmt.

Nachdem das Objekt 2 belastet ist, verändert sich das Speckle-Interferenzfeld entsprechend. Es werden wiederum die Phasenverteilung θ_{+2} für den Beleuchtungsstrahl 15 unter dem Winkel $+\theta_{xz}$ bei geschlossenem

60 Verschuß 18 und bei offenem Verschuß 17 und weiterhin die Phasenverteilung θ_{-2} für den Beleuchtungsstrahl 16 unter dem Winkel $-\theta_{xz}$ bei geöffnetem Verschuß 18 und bei geschlossenem Verschuß 17 ermittelt und aus den gemessenen Intensitätsverteilungen der phasenverschobenen Shearogramme bestimmt.

Durch digitale Subtraktion der Phasenverteilungen im unbelasteten bzw. belasteten Zustand des Objekts 2

mittels des Rechners 10 können die relativen Phasenänderungswerte $\Delta_{+\theta}$ für den Beleuchtungsstrahl 15 unter dem Winkel $+\theta_{xz}$ der Lichtquelle 1 ermittelt werden. Ähnlich wie $\Delta_{+\theta}$ können die relativen Phasenänderungswerte $\Delta_{-\theta}$ für den Beleuchtungsstrahl 16 unter dem Winkel $-\theta_{xz}$ der Lichtquelle 19 berechnet werden.

Bei der oben anhand der Vorrichtung nach Fig. 3 erläuterten Verfahrensweise können die Öffnungs- und Schließzeiten der Verschlüsse 17 und 18 so schnell gesteuert werden, daß deren halbe, einfache oder doppelte Frequenz mit der Anregungsfrequenz eines zu Schwingungen angeregten Objekts übereinstimmt, wodurch die in-plane Dehnungen mit dem optoelektronischen Sensor 6a aufgezeichnet werden können. Dazu sind die Verschlüsse 17 und 18 durch akusto- oder elektrooptische Modulatoren an gleicher Stelle im Strahlengang 15 und 16 zu ersetzen. Die schnelle Steuerung der Öffnungs- und Schließzeiten der Verschlüsse 17 und 18 führt zur Echtzeit-Registrierung von reinen in-plane und out-of-plane Dehnungen.

Eine weitere Variante bei der Vorrichtung nach Fig. 3 könnte darin bestehen, vor der Shearing-Anordnung 3 eine aus einem Objektiv und einer nachgeschalteten Linse bestehende Abbildungsoptik 20 derart anzuordnen, daß zwischen dem Objektiv und der Linse eine Zwischenabbildung 21 entsteht und dadurch bedingt hinter der Linse parallele Lichtstrahlen des abzubildenden Objekts erzeugt werden, die die Shearing-Anordnung 3 und anschließend eine weitere Linse vor dem Sensor 6a durchlaufen.

Grundlage für eine exakte Messung sind jeweils zwei Shearogramme mit zwei verschiedenen Beleuchtungswinkeln θ_1 und θ_2 in derselben Ebene xz oder yz . Unter dieser Voraussetzung ergeben sich die zwei folgenden Grundgleichungen der Shearografie mit $\sin(-\theta) = -\sin\theta$ für die Vershearung in x -Richtung:

$$-\frac{n_1\lambda}{\delta x} = \sin\theta_1 \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos\theta_1) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1)$$

$$-\frac{n_2\lambda}{\delta x} = \sin\theta_2 \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos\theta_2) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2)$$

Für die hellen Interferenzstreifen gilt für die relative Phasenverschiebung $\Delta = 2\pi n$ mit n als Streifenordnung. Durch Subtrahieren der Gleichung (1) von der Gleichung (2) ergibt sich die folgende Auswertegleichung mit λ als Wellenlänge des Laserlichts:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{n_2(1 + \cos\theta_1) - n_1(1 + \cos\theta_2)}{\sin\theta_1(1 + \cos\theta_2) - \sin\theta_2(1 + \cos\theta_1)} \frac{\lambda}{\delta x} \quad (3)$$

Diese Gleichung ist unabhängig von dem out-of-plane Term $\partial w/\partial x$. Wenn die Beleuchtungswinkel die Werte $\theta_1 = \theta$ und $\theta_2 = -\theta$ annehmen, so ergibt sich für die Interferenzstreifen folgendes:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = (n_2 - n_1) \frac{\lambda}{2\delta x \sin\theta} \quad (4)$$

Darin sind δx der Shearabstand auf der Objektoberfläche in x -Richtung, n_1 die Streifenordnung für $+\theta$ und n_2 die Streifenordnung für $-\theta$.

Analoges gilt für die y -Richtung als Shearrichtung.

Aus den oben genannten Grundgleichungen der Shearografie können die relativen Phasenänderungen $\Delta_{+\theta}$ (entspricht dem Beleuchtungswinkel $+\theta_{xz}$) und $\Delta_{-\theta}$ (entspricht dem Beleuchtungswinkel $-\theta_{xz}$) wie folgt ausgedrückt werden:

$$\Delta_{+\theta} = -\frac{2\pi}{\lambda} [\sin(\theta_{xz}) \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos(\theta_{xz})) \frac{\partial w}{\partial x}] \delta x \quad (5)$$

$$\Delta_{-\theta} = -\frac{2\pi}{\lambda} [\sin(-\theta_{xz}) \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos(-\theta_{xz})) \frac{\partial w}{\partial x}] \delta x \quad (6)$$

Weil die relativen Phasenänderungen $\Delta_{+\theta}$ und $\Delta_{-\theta}$ berechnet worden sind, kann direkt aus dem digitalen Subtrahieren $\Delta_{-\theta}$ von $\Delta_{+\theta}$ ein Streifenmuster, das die reine in-plane Dehnung $\partial u/\partial x$ darstellt, für die x,z -Beleuchtungsebene in x -Richtung als Shearrichtung geliefert werden:

$$\Delta_{s1} = \Delta_{+\theta} - \Delta_{-\theta} = -\frac{4\pi\delta x \sin(\theta_{xz})}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (7)$$

Für verschiedene Shearrichtungen und Beleuchtungsebenen ergeben sich unterschiedliche Streifenmuster, die den verschiedenen in-plane Komponenten des Dehnungstensors entsprechen:

$$\Delta_{s2} = \Delta_{+\theta} - \Delta_{-\theta} = -\frac{4\pi\delta y \sin(\theta_{xz})}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial y} \quad (8)$$

für die xz-Beleuchtungsebene und die y-Shearrichtung,

$$\Delta_{s3} = \Delta_{+\theta} - \Delta_{-\theta} = -\frac{4\pi\delta x \sin(\theta_{yz})}{\lambda} \frac{\partial v}{\partial x} \quad (9)$$

für die yz-Beleuchtungsebene und die x-Shearrichtung, sowie

$$\Delta_{s4} = \Delta_{+\theta} - \Delta_{-\theta} = -\frac{4\pi\delta y \sin(\theta_{yz})}{\lambda} \frac{\partial v}{\partial y} \quad (10)$$

für die yz-Beleuchtungsebene und die y-Shearrichtung.

Aus den Gleichungen (7) bis (10) folgt, daß in ihnen die Terme $\partial w/\partial x$ usw. nicht mehr enthalten sind und damit ausschließlich für die in-plane Verformungen charakteristische Größen erhalten werden.

Außer zur reinen in-plane Dehnungsmessung kann diese Technik aber auch zur Messung der out-of-plane Dehnungsanteile $\partial w/\partial x$ und $\partial w/\partial y$ unter einem beliebigen Beleuchtungswinkel θ der Beleuchtungsquellen 1 und 19 durch digitales Addieren von $\Delta_{-\theta}$ und $\Delta_{+\theta}$ dienen.

Aus den oben angegebenen Gleichungen folgt:

$$\Delta_{A1} = \Delta_{+\theta} + \Delta_{-\theta} = -[1 + \cos(\theta_{xz})] \frac{4\pi\delta x}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (11)$$

Für die y-Shearrichtung ergibt sich:

$$\Delta_{A2} = \Delta_{+\theta} + \Delta_{-\theta} = -[1 + \cos(\theta_{xz})] \frac{4\pi\delta y}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (12)$$

Aus den beiden zuletzt genannten Gleichungen können die Werte $\partial w/\partial x$ und $\partial w/\partial y$ erhalten werden.

Rein rechnerisch erfolgt die Auswertung dabei jeweils so, daß zunächst die Ergebnisse im belasteten und unbelasteten Zustand bei den Winkeln $+\theta_{xz}$ und $-\theta_{xz}$ einschließlich der erforderlichen Phasenverschiebungen gespeichert werden. Hierdurch werden die Werte $\Delta_{+\theta}$ und $\Delta_{-\theta}$ erhalten, die in den Fig. 4a und 5a (für $\Delta_{+\theta}$) und in Fig. 4b und 5b (für $\Delta_{-\theta}$) als sogenannte Zwischenbilder dargestellt sind. Aus diesen Ergebnissen werden dann durch Bildung der Differenzen (oben z. B. Δ_{s1}) die reinen in-plane Terme errechnet, die in Fig. 4c und 5c dargestellt sind, oder durch Bildung der Summen (z. B. oben Δ_{A1}) die reinen out-of-plane Terme errechnet, die in Fig. 4d dargestellt sind. Unregelmäßigkeiten in den Interferenzmustern, die nach Fig. 4a, 4b, 5a und 5b durch kombinierte in-plane und out-of-plane Verformungen des Objekts 2 erhalten werden, müssen daher nicht mehr wie bisher in Kauf genommen werden. Derartige Interferenzmuster können vielmehr entsprechend Fig. 4c und 5c in reine in-plane Streifenmuster oder entsprechend Fig. 4d in reine out-of-plane Streifenmuster zerlegt werden.

Beispiele für die aus den obigen Gleichungen Δ_{s1} bis Δ_{s4} errechenbaren Werten von $\partial u/\partial x$, $\partial u/\partial y$, $\partial v/\partial x$ und $\partial v/\partial y$ sind in Fig. 6a bis 6d und 7a bis 7d dargestellt, und zwar jeweils für einen Zugstab mit Außenkerben bzw. mit einem Mittelloch bei einer Belastung von 150 N. Die Streifenmuster sind über der Mittelachse symmetrisch, und der Kontrast der Streifen ist sehr gut.

Bei der Vorrichtung nach Fig. 3 können die beiden Beleuchtungsstrahlen 15 und 16 auch mit der Einrichtung nach Fig. 8 erzeugt werden. Hier ist vor einer einzigen Lichtquelle 1 ein Spiegel 22 derart angeordnet, daß das Licht entweder in einem direkten Strahl 15 oder nach Reflexion am Spiegel 22 in einem indirekten Strahl 16 auf das Objekt 2 auftritt. In einem unmittelbar vor der Lichtquelle 1 angeordneten Verschluss 23 kann das Objekt 2 somit wahlweise direkt oder über den Spiegel 22 indirekt illuminiert werden.

Die Gleichungen (7) bis (12) zeigen, daß es zur Ermittlung der sechs Terme $\partial u/\partial x$, $\partial v/\partial x$, $\partial w/\partial x$ und $\partial u/\partial y$,

$\partial v/\partial y, \partial w/\partial y$ mit Hilfe der Vorrichtung nach Fig. 3 erforderlich ist, unterschiedliche Einstellungen vorzunehmen. Dabei muß außerdem die Belastung des Objekts 2 mehrfach geändert werden. So können z. B. die Terme $\partial u/\partial x$ und $\partial w/\partial x$ dadurch erhalten werden, daß die Lichtquellen 1, 19 in der xz-Ebene angeordnet werden und die Shearung in x-Richtung vorgenommen wird (Gleichungen (7) und (11)). Sollen dagegen z. B. die Terme $\partial v/\partial y$ und $\partial w/\partial y$ erhalten werden, müßte entsprechend die Lichtquelle in der yz-Ebene angeordnet und die Shearung in y-Richtung durchgeführt werden. Diese unterschiedlichen Einstellungen bringen jedoch erhebliche meßtechnische Probleme mit sich, weil alle Einstellungen sowohl für das Null-Shearogramm als auch für die Belastungs-Shearogramme jeweils im wesentlichen identisch sein müssen. Dies ist durch Verschwenkung der Lichtquellen 1 bzw. 19 oder Verkippen des Spiegels 5 praktisch unmöglich, da eine Genauigkeit für die auf die Bildebene 6 fallenden Lichtstrahlen im μ -Bereich erforderlich wäre. Abgesehen davon ist auch eine mehrmalige identische Belastungsänderung des Objekts 2 kaum realisierbar. Zwar wäre es denkbar, an sich bekannte Shearing-Elemente zu verwenden, die das Licht gleichzeitig in x- und y-Richtung ablenken können (DE 44 14 287 A1), doch sind derartige Elemente nur in Verbindung mit Bildaufnehmern in Form von fotografischen Filmen, nicht aber in Verbindung mit Bildaufnehmern in Form von optoelektronischen Sensoren auf CCD-Basis oder dergleichen brauchbar, deren Anwendung wegen der leichteren Auswertung der Meßergebnisse bevorzugt wird.

Ein erstes Ausführungsbeispiel der Zusatzfindung (Fig. 9), bei dem gleiche Teile mit den selben Bezugszeichen wie in Fig. 1 bis 8 versehen sind, enthält analog zu Fig. 3 die Zweistrahl-Interferometer-Anordnung 3 mit dem Shearing-Spiegel 5 und dem weiteren Spiegel 4 zur Herstellung der Phasenschiebungen. Das vom Objekt 2 kommende Licht wird auf einen optoelektronischen Sensor 6a, vorzugsweise eine CCD-Kamera, gelenkt und wie in Fig. 3 weiterverarbeitet.

Zur Beleuchtung des Objekts 2 dienen in Fig. 9 vier Lichtquellen 1a, 1b, 1c und 1d, wobei die Achsen der beiden Lichtquellen 1a und 1b in der xz-Ebene und die Achsen der beiden Lichtquellen 1c und 1d in der yz-Ebene angeordnet sind und mit der Betrachtungsrichtung (z-Achse) jeweils die Winkel $+\theta_{xz}$, $-\theta_{xz}$ und $+\theta_{yz}$, $-\theta_{yz}$ bilden. Für die Beleuchtungsebene xz und die Shearung mittels des Spiegels 5 in x-Richtung ergibt sich analog zu den obigen Gleichungen

$$\Delta_{+\theta_{xz}} = -\frac{2\pi}{\lambda} [\sin(\theta_{xz}) \frac{\partial u}{\partial x} + [1 + \cos(\theta_{xz})] \frac{\partial w}{\partial x}] \delta x \quad (13)$$

$$\Delta_{-\theta_{xz}} = -\frac{2\pi}{\lambda} [\sin(-\theta_{xz}) \frac{\partial u}{\partial x} + [1 + \cos(-\theta_{xz})] \frac{\partial w}{\partial x}] \delta x. \quad (14)$$

Dagegen werden analog für die Beleuchtungsebene yz und die Shearung in y-Richtung die folgenden Gleichungen erhalten:

$$\Delta_{+\theta_{yz}} = -\frac{2\pi}{\lambda} [\sin(\theta_{yz}) \frac{\partial v}{\partial x} + [1 + \cos(\theta_{yz})] \frac{\partial w}{\partial x}] \delta x \quad (15)$$

$$\Delta_{-\theta_{yz}} = -\frac{2\pi}{\lambda} [\sin(-\theta_{yz}) \frac{\partial v}{\partial x} + [1 + \cos(-\theta_{yz})] \frac{\partial w}{\partial x}] \delta x. \quad (16)$$

Durch Subtraktion der Gleichung (14) von der Gleichung (13) ergibt sich analog zur Gleichung (7):

$$\Delta_{s1} = \Delta_{+\theta_{xz}} - \Delta_{-\theta_{xz}} = -\frac{4\pi\delta x \sin(\theta_{xz})}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (17)$$

während die Addition von (13) und (14) analog zu Gleichung (11) zu

$$\Delta_{a1} = \Delta_{+\theta_{xz}} + \Delta_{-\theta_{xz}} = -[1 + \cos(\theta_{xz})] \frac{4\pi\delta x}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (18)$$

führt.

Schließlich wird durch Subtraktion der Gleichung (16) von der Gleichung (15) analog zur Gleichung (9) der Ausdruck

$$\Delta_{\pm\theta_x} = \Delta_{+\theta_x} - \Delta_{-\theta_x} = -\frac{4\pi\delta x \sin(\theta_x)}{\lambda} \frac{\partial v}{\partial x} \quad (19)$$

erhalten.

Durch Beleuchtung in den xz- und yz-Ebenen und Shearing in x-Richtung lassen sich daher die Terme $\partial u/\partial x$, $\partial v/\partial x$ und $\partial w/\partial x$ erhalten, ohne daß die Lagen der Lichtquellen verändert werden müssen. Der Spiegel 5 braucht nur einmal in x-Richtung gekippt werden. Die Bewegungen des Spiegels 4 und die Steuerung eventuell vorhandener Verschlüsse oder dergleichen werden entsprechend dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 3 durchgeführt.

Durch Änderung der Shearrichtung des Spiegels 5 in y-Richtung und analoge Anwendung der Gleichungen (13) bis (19) können die Terme $\partial u/\partial y$, $\partial v/\partial y$ und $\partial w/\partial y$ erhalten werden. Alle sechs Terme ergeben sich daher durch zwei Meßreihen anstatt durch vier Meßreihen (Fig. 3).

Bei der Ausführungsform nach Fig. 10 sind drei Lichtquellen 1e, 1f und 1g vorgesehen, wobei die Lichtquellen 1e, 1f z. B. in der xz-Ebene ($+\theta_{xz}$, $-\theta_{xz}$) angeordnet sind, wohingegen die Lichtquelle 1g in der yz-Ebene liegt (z. B. $+\theta_{yz}$). Bei im übrigen gleicher Ausbildung einer Zweistrahl-Interferometer-Anordnung 3a wie in Fig. 9 können die Gleichungen (13), (14) und (15) kombiniert werden, wodurch sich wie im obigen Beispiel die Gleichungen (17) und (18) ergeben. Wird $\theta_{xz} = \theta_{yz}$ gewählt, die Gleichung (15) mit dem Faktor 2 multipliziert und die Gleichung (18) vom Ergebnis davon abgezogen, dann ergibt sich

$$\Delta_{\pm\theta_x} = 2\Delta_{+\theta_x} - \Delta_{\pm\theta_x} = -\frac{4\pi\delta x \sin(\theta_x)}{\lambda} \frac{\partial v}{\partial x} \quad (20)$$

Auch in diesem Fall können somit mittels einer einzigen Meßreihe die Terme $\partial u/\partial x$, $\partial v/\partial x$, $\partial w/\partial x$ erhalten werden. Dasselbe gilt für die drei übrigen Terme bei entsprechender Anwendung der obigen Gleichungen.

Die Vorrichtung nach Fig. 10 kann dadurch erweitert werden, daß anstelle des Shearing-Spiegels 5 zwei Shearing-Spiegel 5a und 5b vorgesehen werden, die auf einer linearen Gleitführung 26 oder dergleichen derart verschiebbar gelagert sind, daß sie wahlweise dem Strahlteiler 7 so zugeordnet werden können, wie anhand der Fig. 1 und 3 für den Spiegel 5 beschrieben ist. Dabei ist z. B. der Spiegel 5a um eine zur z-Achse parallele Achse schwenkbar und für die Vershearung in y-Richtung eingerichtet, wohingegen der Spiegel 5b um eine zur y-Achse parallele Achse schwenkbar und für die Vershearung in x-Richtung eingerichtet ist. Die Verschiebung der Spiegel 5a, 5b in z-Richtung kann z. B. manuell oder motorisch erfolgen.

Die Arbeitsweise bei der Anwendung der beiden Kippspiegel 5a, 5b ist z. B. wie folgt. Es werden zunächst mit Hilfe des Spiegels 5b und der Lichtquellen 1e, 1f und 1g nacheinander drei Null-Shearogramme für die Shearung in x-Richtung aufgenommen und im Rechner 10 gespeichert. Anschließend wird durch Verschiebung der zweckmäßig zu einer Baueinheit zusammengefaßten Spiegel 5a, 5b der Spiegel 5a für die y-Shearrichtung in Position gebracht und die Aufnahme der drei Null-Shearogramme für die y-Richtung und die drei Lichtquellen 1e, 1f und 1g wiederholt. Danach wird das Objekt 2 durch eine Kraft, durch Erwärmung, durch Aufprägung einer Schwingung oder dergleichen belastet, und danach werden je drei Belastungs-Shearogramme für die x- bzw. y-Shearrichtung aufgenommen, wobei die Reihenfolge, in der die Spiegel 5a, 5b verwendet werden, beliebig ist. Die drei Belastungsshearogramme werden ebenfalls im Rechner gespeichert. In allen Fällen kann mit dem Spiegel 4 die gewünschte Phasenschiebung durchgeführt werden.

Für die Auswertung stehen, soweit es die x-Shearrichtung betrifft, die obigen Gleichungen (13), (14) und (15) zur Verfügung. Dagegen ergeben sich für die y-Shearrichtung die folgenden Gleichungen:

$$\Delta_{+\theta_x} = -\frac{2\pi}{\lambda} [\sin(\theta_x) \frac{\partial u}{\partial y} + [1 + \cos(\theta_x)] \frac{\partial w}{\partial y}] \delta y \quad (21)$$

$$\Delta_{-\theta_x} = -\frac{2\pi}{\lambda} [\sin(-\theta_x) \frac{\partial u}{\partial y} + [1 + \cos(-\theta_x)] \frac{\partial w}{\partial y}] \delta y \quad (22)$$

$$\Delta_{+\theta_x} = -\frac{2\pi}{\lambda} [\sin(\theta_x) \frac{\partial v}{\partial y} + [1 + \cos(\theta_x)] \frac{\partial w}{\partial y}] \delta y \quad (23)$$

Die Gleichungen (13), (14) und (15) werden entsprechend den Gleichungen (17), (18) und (20) weiterbehandelt, woraus sich die Terme $\partial u/\partial x$, $\partial v/\partial x$ und $\partial w/\partial x$ berechnen lassen, während die Gleichungen (21), (22) und (23) bei einer zu den Gleichungen (17), (18) und (20) analogen Behandlung zu den Termen $\partial u/\partial y$, $\partial v/\partial y$ und $\partial w/\partial y$ führen. Dadurch können mittels einer einzigen Belastungsänderung des Objekts 2 alle sechs gesuchten Terme digital erfaßt werden, was die Genauigkeit der Messung wesentlich vergrößert.

Bei Anwendung der beiden Kippspiegel 5a, 5b und der vier Lichtquellen 1a bis 1d im Sinne der Fig. 9 können in ähnlicher Weise acht Gleichungen erhalten werden, die dann nach den Gleichungen (17), (18) und (19) zur Berechnung der sechs Terme benutzt werden können.

Bei der Ausführungsform nach Fig. 11 werden wie in Fig. 10 drei Lichtquellen 1e, 1f und 1g in Kombination mit zwei kippbaren Shearing-Spiegeln 5c, 5d angewendet. Die beiden Spiegel 5c und 5d sind z. B. in y-Richtung übereinander angeordnet, wobei der Spiegel 5c um eine zur z-Achse parallele Achse und der Spiegel 5d um eine zur y-Achse parallele Achse schwenkbar ist, so daß der Spiegel 5c für Vershearungen in y-Richtung und der Spiegel 5d für Vershearungen in x-Richtung zuständig ist. Im Gegensatz zur Fig. 9 sind außerdem zwei z. B. in y-Richtung übereinander angeordnete Strahlteiler 7a und 7b vorgesehen, denen je einer der beiden Shearing-Spiegel 5c, 5d und je ein optoelektronischer Sensor 6a, 6b fest zugeordnet ist. Eine einzige Phasenschiebungseinheit enthält einen über beide Strahlteiler 7a, 7b erstreckten Spiegel 4a, so daß durch dessen Verschiebung exakt gleiche Phasenschiebungen für beide Shearrichtungen erzeugt werden können. Die bei Bedarf benötigten Verschlüsse und sonstigen optischen Einrichtungen sind der Einfachheit halber in Fig. 11 weggelassen. Die Strahlteiler 7a, 7b und die Spiegel 5c und 5d bilden zusammen mit dem zugehörigen Teil des Spiegels 4 je eine komplette Shearing-Einheit.

Bei Anwendung der Vorrichtung nach Fig. 11 können analog zur obigen Beschreibung durch Subtraktion und Addition der erhaltenen Shearogramme mit einer einzigen Belastungsänderung des Objekts 2 alle sechs gesuchten Terme $\partial u/\partial x$ bis $\partial w/\partial y$ erhalten werden, wobei die Auswertung in x- und y-Richtung wegen des Vorhandenseins der zwei getrennten Sensoren 6a und 6b gleichzeitig und unabhängig voneinander erfolgen kann. Außerdem versteht sich, daß in Fig. 11 wie in Fig. 9 wahlweise auch vier Lichtquellen vorgesehen werden können.

Die in Fig. 11 gezeigte Vorrichtung kann bei größeren Objekten 2 dadurch zu Problemen führen, daß vom Objekt 2 reflektierte und auf die Strahlteiler 7a, 7b treffenden Lichtbündel 27, 28 einen Winkel miteinander bilden und daher die Betrachtungsrichtungen nicht genau senkrecht zur Objektoberfläche verlaufen. Zur Vermeidung dieses Problems ist bei der Vorrichtung nach Fig. 12 vorgesehen, ein vom Objekt 2 reflektiertes Lichtbündel 29 zunächst auf einen Strahlteiler 7c treffen zu lassen und dadurch in zwei Lichtbündel 30 und 31 zu teilen, die z. B. senkrecht zueinander stehen. Jedem dieser Lichtbündel 30, 31 ist je eine komplette Shearing-Einheit 3b, 3c entsprechend Fig. 9 zugeordnet, wobei z. B. die Anordnung 3b für die x-Shearrichtung und die Anordnung 3c für die y-Shearrichtung eingerichtet ist. Dadurch ist sichergestellt, daß die Betrachtungsrichtung für beide Anordnungen 3b, 3c durch das Lichtbündel 29 definiert und senkrecht zur Objektoberfläche angeordnet ist. Im übrigen ist die Vorrichtung nach Fig. 12 analog zur Vorrichtung nach Fig. 11 aufgebaut, so daß mit einer einzigen Belastungsänderung des Objekts 2 wiederum alle sechs gesuchten Terme $\partial u/\partial x$ bis $\partial w/\partial y$ erhalten werden können. Dabei bringen die Vorrichtungen nach Fig. 11 und 12 den besonderen Vorteil mit sich, daß zur Ermittlung aller sechs Terme im Vergleich zur Fig. 10 nur eine Verkipfung der Shearing-Spiegel erforderlich ist, d. h. die Shearing-Spiegel brauchen auch nicht linear verschoben werden.

Die Erfindung ist nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt, die sich auf vielfache Weise abwandeln lassen. Insbesondere können die beschriebenen Merkmale einzeln oder gesamt in anderen als den dargestellten und beschriebenen Kombinationen verwendet werden. Dabei ist vor allem auch zu beachten, daß die Shearing-Anordnungen in Fig. 3 nur beispielsweise als Zweistrahlinterferometer 3 dargestellt wurden, weil sich mit ihm die Shearung und Phasenschiebung in besonders einfacher Weise durchführen lassen. Alternativ können bei entsprechender Ergänzung der übrigen Komponenten im Sinne der vorliegenden Erfindung aber auch andere Shearing-Anordnungen (z. B. DE 44 14 287 A1) verwendet werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur shearografischen Ermittlung von Ableitungen der in-plane und out-of-plane Verformungen einer Oberfläche eines Objekts (2) in wenigstens eine ausgewählte Richtung, bei dem die Objektoberfläche mit kohärentem Licht einer Lichtquelle (1a bis 1g) bestrahlt, das von dieser diffus reflektierte Licht mittels eines eine Shearing-Anordnung (3, 3a bis 3c) und eine optische Achse (z) aufweisenden optischen Systems in einer Bildebene (6) abgebildet und von der Objektoberfläche wenigstens ein Null-Shearogramm und ein Belastungs-Shearogramm aufgenommen wird, wobei zur Ermittlung reiner in-plane oder out-of-plane Dehnungen die Objektoberfläche aus unterschiedlichen Richtungen ($+\theta_{xz}$, $-\theta_{xz}$ bzw. $+\theta_{yz}$, $-\theta_{yz}$) nacheinander (sequentiell) bestrahlt wird und die reinen in-plane oder out-of-plane Anteile durch Kombination der dadurch erhaltenen Shearogramme ermittelt werden, nach Hauptpatent (Patentanmeldung P 44 46 887.3), dadurch gekennzeichnet, daß die Bestrahlung aus wenigstens drei unterschiedlichen Richtungen erfolgt, wobei die Bestrahlung aus zwei Richtungen ($+\theta_{xy}$, $-\theta_{xy}$) vorzugsweise spiegelsymmetrisch zu einer gemeinsamen, die optische Achse (z) einschließenden ersten Ebene (xz) erfolgt, während die Bestrahlung aus der dritten Richtung ($+\theta_{yz}$) in einer senkrecht zur erst n Ebene liegenden, die optische Achse (z) einschließenden zweiten Ebene (yz) erfolgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Bestrahlung aus vier Richtungen erfolgt, wobei die Bestrahlung aus der vierten Richtung ($-\theta_{yz}$) in der zw. iten Ebene (yz) stattfindet.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Winkel, unter denen die Bestrahlungen aus drei Richtungen erfolgen, gleich sind, und daß die Winkel ($\pm \theta_{xz}$ bzw. $\pm \theta_{yz}$), unter denen die Bestrahlungen aus vier Richtungen erfolgen, in jeder Ebene (xz bzw. yz) jeweils untereinander gleich sind.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Kombination der Shearogramme durch Addition oder Subtraktion relativer Phasenänderungen erfolgt.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die aus den drei oder vier unterschiedlichen Richtungen erfolgende Bestrahlung der Objektoberfläche mit den erforderlichen Phasenschiebungen erfolgt, für jede Richtung die im unbelasteten und belasteten Zustand des Objekts (2) erhaltenen Abbildungen digital gespeichert werden und die daraus abgeleiteten relativen Phasenänderungen addiert oder subtrahiert werden.

6. Vorrichtung zur shearografischen Ermittlung von Ableitungen der Verformungen an einer Oberfläche eines Objekts (2) in ausgewählte Shearrichtungen, enthaltend:

10 kohärentes Licht erzeugende Mittel (1a bis 1g) zur Bestrahlung der Objektoberfläche aus unterschiedlichen Richtungen ($+ \theta_{xz}$, $- \theta_{xz}$ bzw. $+ \theta_{yz}$, $- \theta_{yz}$), eine Bildebene (6), ein eine optische Achse (z) und wenigstens eine Shearing-Anordnung (3, 3a, 3b, 3c) aufweisendes optisches System zur Abbildung der Objektoberfläche in der Bildebene (6) und Mittel zur Ermittlung reiner in-plane und/oder out-of-plane Dehnungen, nach Hauptpatent (Patentanmeldung P 44 46 887.3), dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Bestrahlung des Objekts (2) aus wenigstens drei Richtungen ($+ \theta_{xz}$, $- \theta_{xz}$, $+ \theta_{yz}$) eingerichtet sind, wobei die Bestrahlung aus zwei Richtungen ($+ \theta_{xz}$, $- \theta_{xz}$ vorzugsweise spiegelsymmetrisch zu einer gemeinsamen, die optische Achse (z) einschließenden ersten Ebene (xz) erfolgt, während die Bestrahlung aus den anderen Richtungen ($+ \theta_{yz}$, $- \theta_{yz}$) in einer senkrecht zur ersten Ebene liegenden, die optische Achse (z) einschließenden zweiten Ebene (yz) erfolgt.

20 7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel drei oder vier Lichtquellen (1e, 1f, 1g bzw. 1a, 1b, 1c, 1d) aufweisen, von denen zwei zur Bestrahlung des Objekts (2) in der ersten Ebene (xz) und die anderen zur Bestrahlung des Objekts (2) in der zweiten Ebene (yz) bestimmt sind.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Shearing-Anordnung (3) zwei parallel zur optischen Achse (z) verschiebbare, zur Vershearung in zueinander senkrechte Richtungen eingerichtete Shearing-Elemente (5a, 5b) aufweist.

25 9. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Shearing-Anordnung (3) zwei Shearing-Einheiten (5c, 7a, 4a, bzw. 5d, 7b, 4a; 3b, 3c) aufweist, die mit je einem Shearing-Element (5c, 5d) versehen sind.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß den Shearing-Einheiten ein gemeinsames Phasenschiebeelement (4a) zugeordnet ist.

30 11. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Shearing-Anordnung (3b, 3c) einen Strahlteiler (7c), der die vom Objekt (2) kommenden Lichtstrahlen (29) in zwei Lichtbündel (30, 31) aufteilt, und zwei je einem dieser Lichtbündel (30, 31) zugeordnete Shearing-Einheiten (3b, 3c) aufweist.

35 12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß jede Shearing-Einheit mit je einem separaten Mittel (6a, 6b) zur Ermittlung der Dehnungen verbunden ist.

Hierzu 10 Seite(n) Zeichnungen

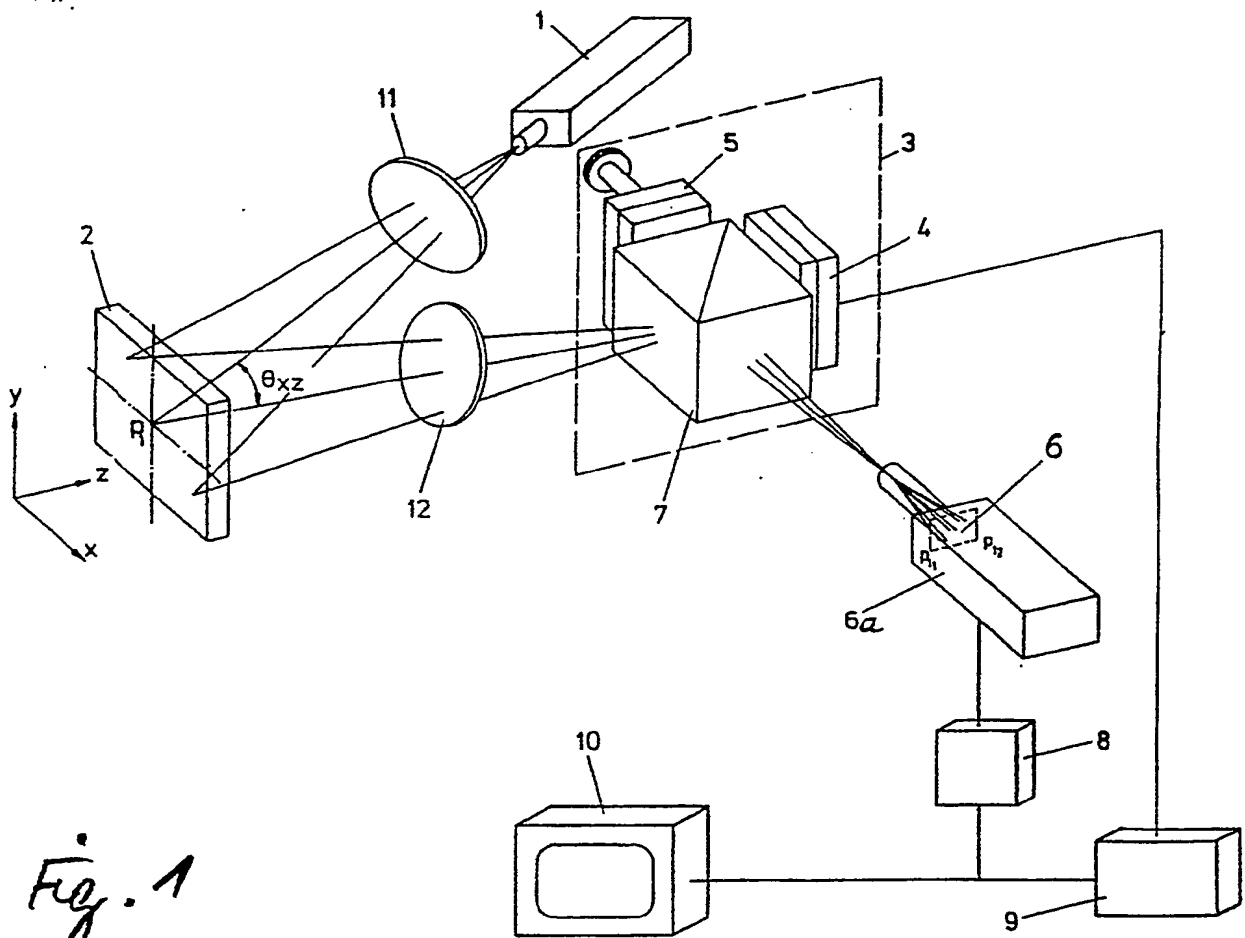


Fig. 1

$$\varepsilon_{xx} = \partial u / \partial x$$

$$\varepsilon_{yy} = \partial v / \partial y$$

$$\partial u / \partial y$$

$$\partial v / \partial x$$



(a)



(b)



(c)

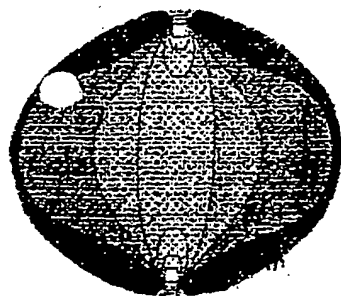


(d)

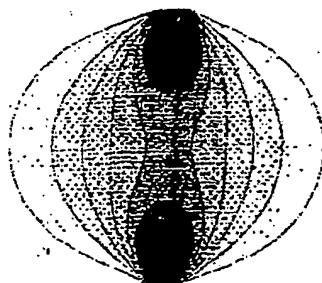
$$\varepsilon_{xx} = \partial u / \partial x$$

$$\varepsilon_{yy} = \partial v / \partial y$$

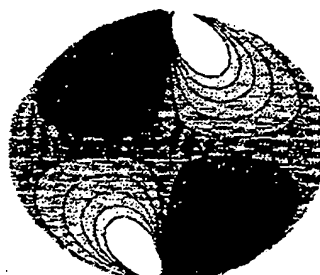
$$\gamma_{xy} = \partial u / \partial y + \partial v / \partial x$$



(e)



(f)



(g)

Fig. 2

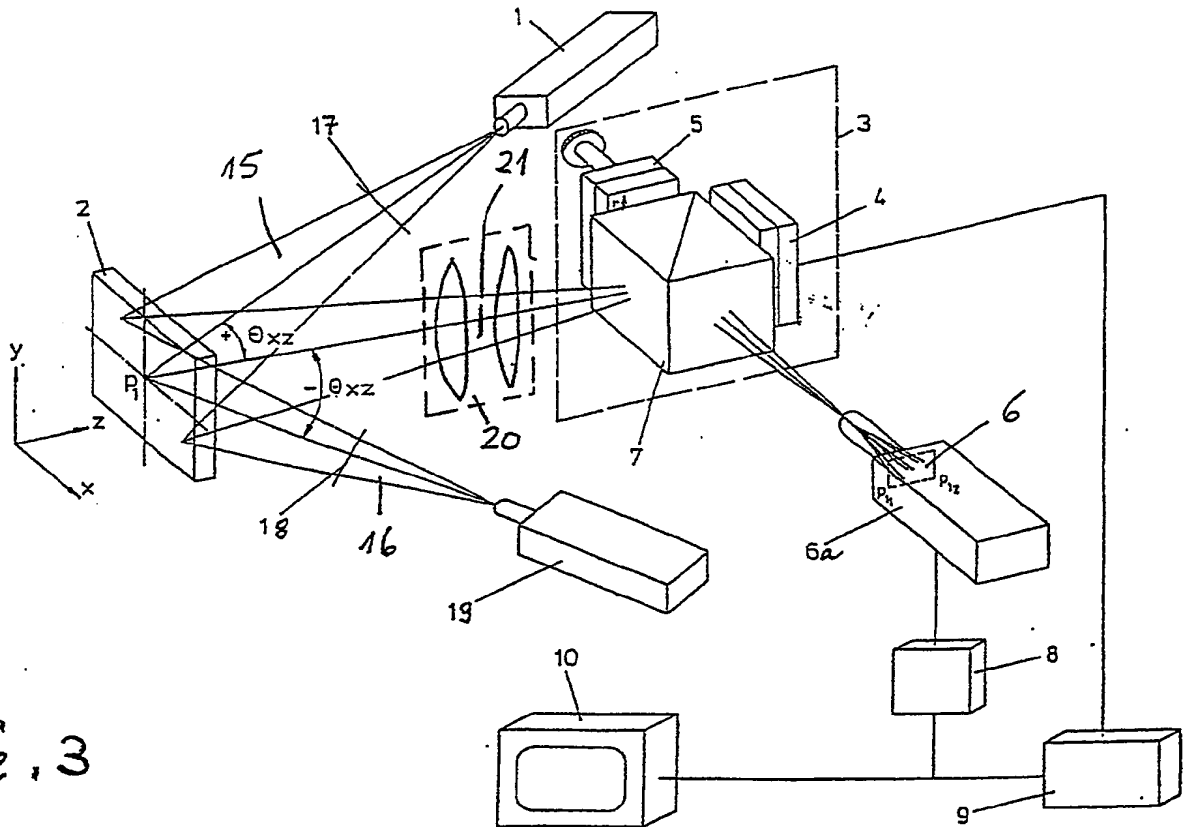
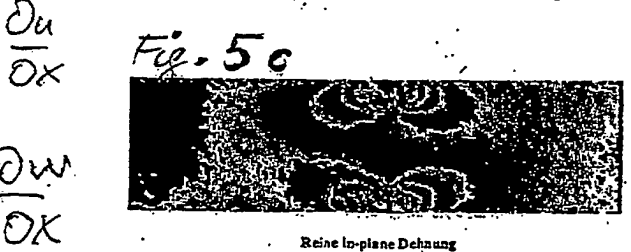
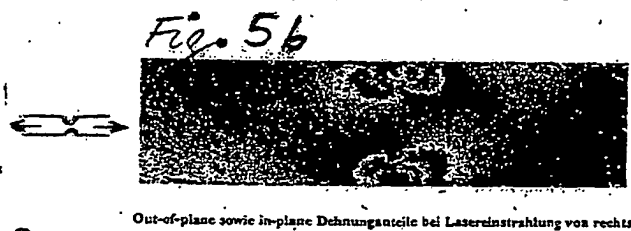
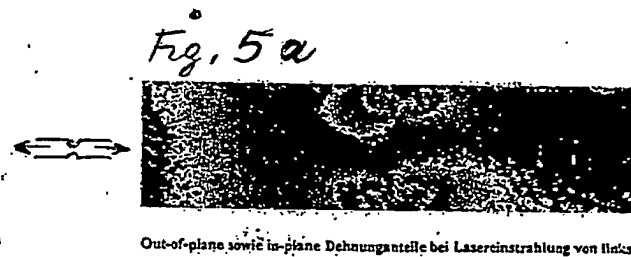
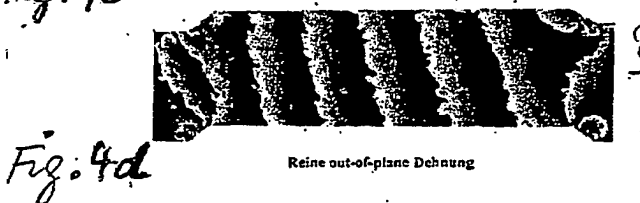
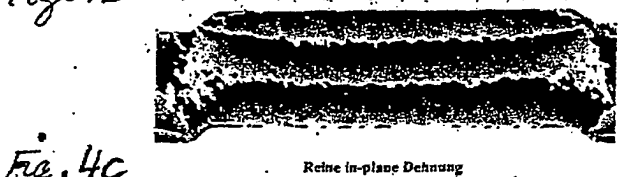
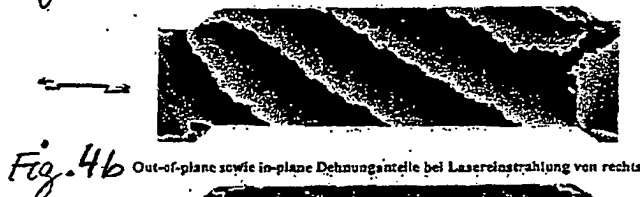
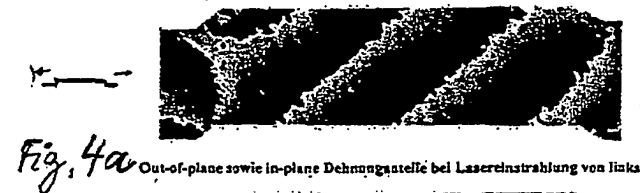


Fig. 3



$$\frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\frac{\partial w}{\partial x}$$

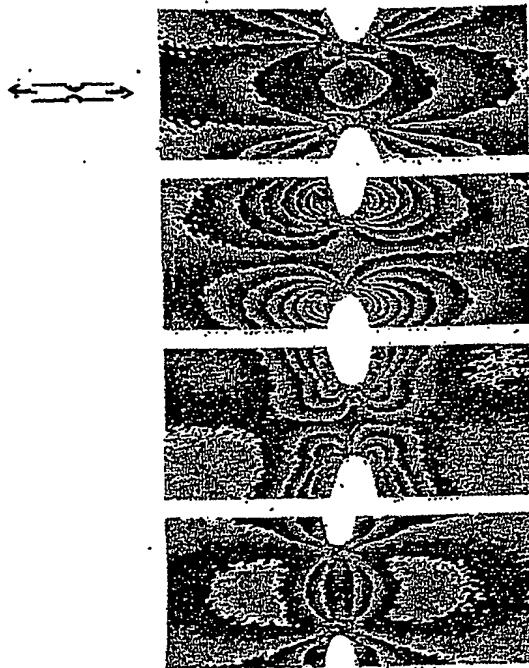


Fig. 6a
 $\partial u / \partial x$

Fig. 6b
 $\partial u / \partial y$

Fig. 6c
 $\partial v / \partial x$

Fig. 6d
 $\partial v / \partial y$

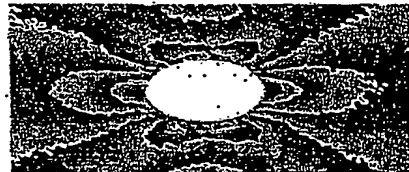


Fig. 7a

$\partial u / \partial x$



Fig. 7b

$\partial u / \partial y$



Fig. 7c

$\partial v / \partial x$

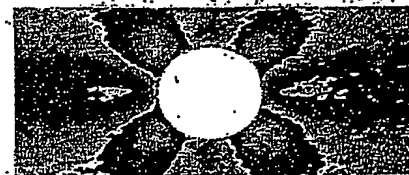


Fig. 7d

$\partial v / \partial y$

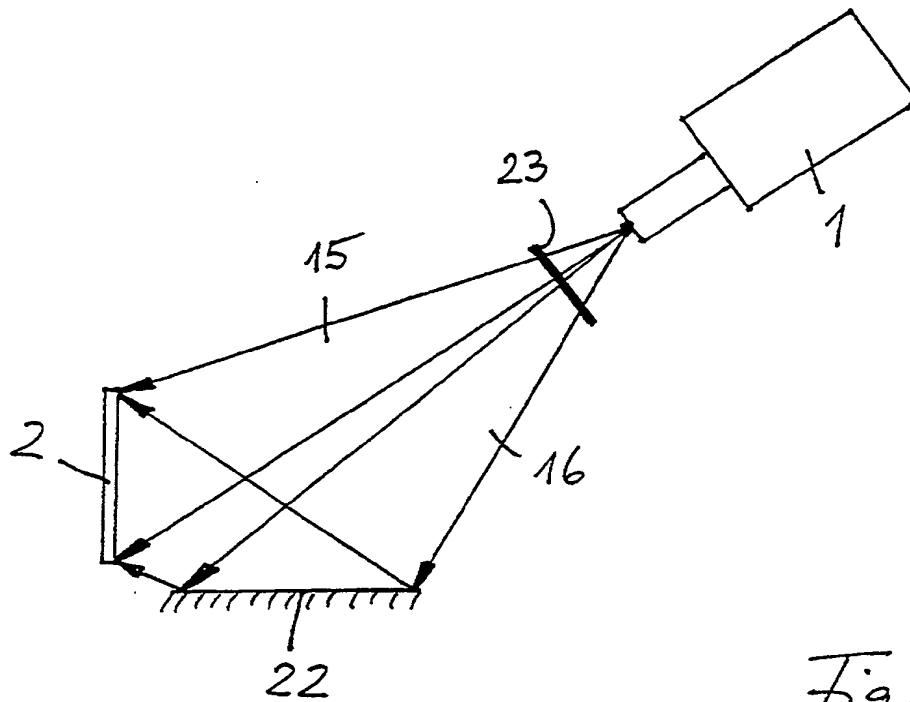


Fig. 8

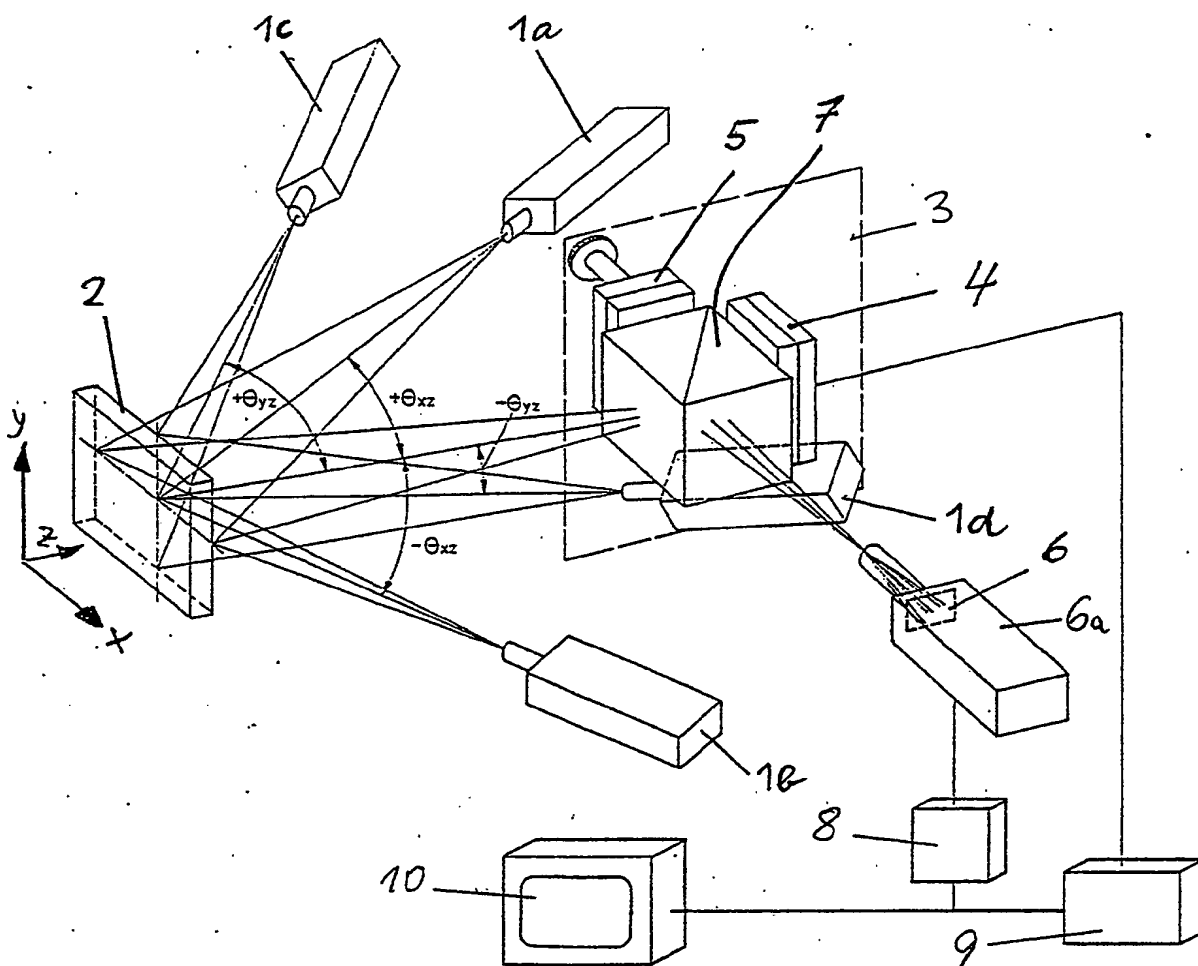


Fig.: 9

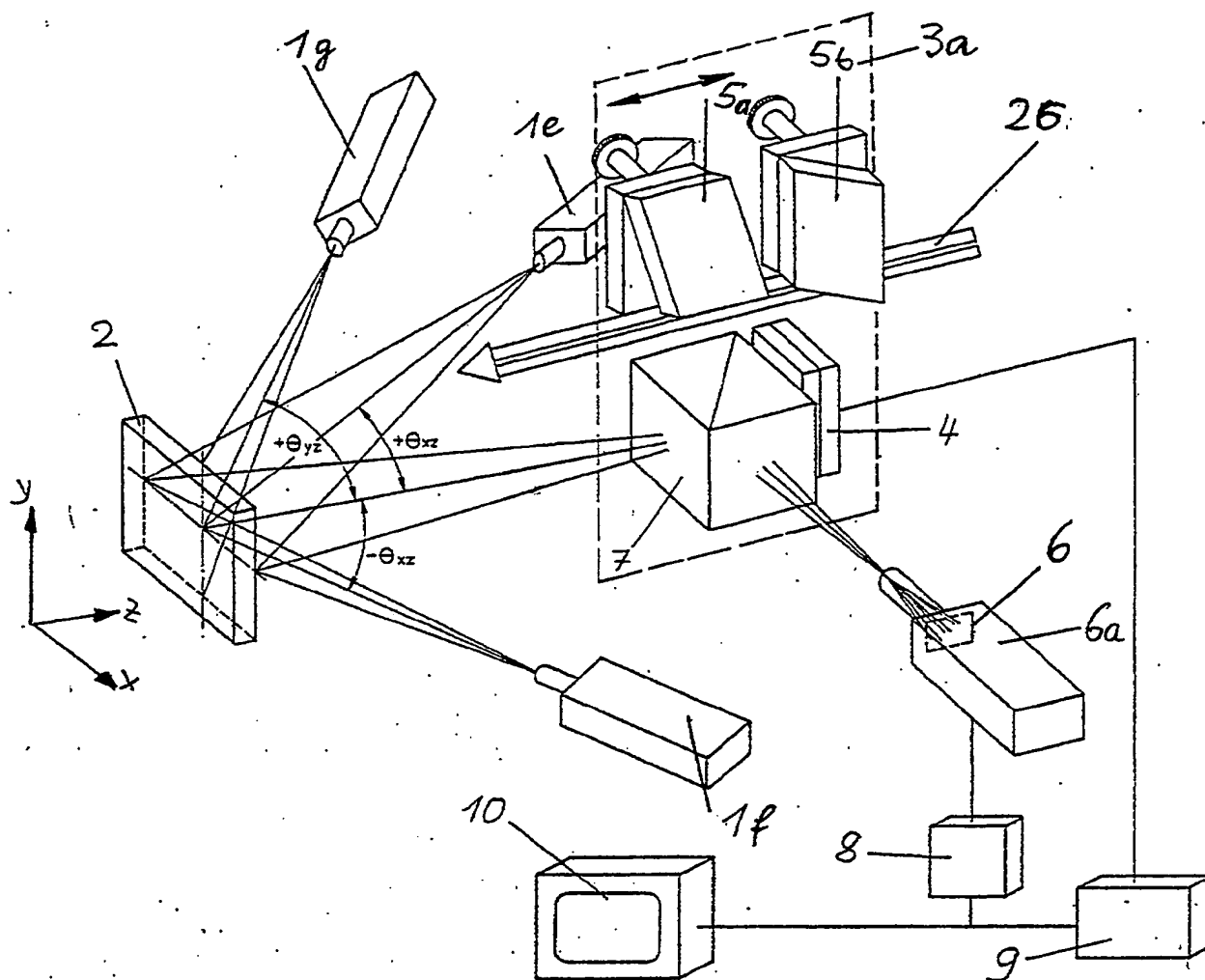


Fig. 10

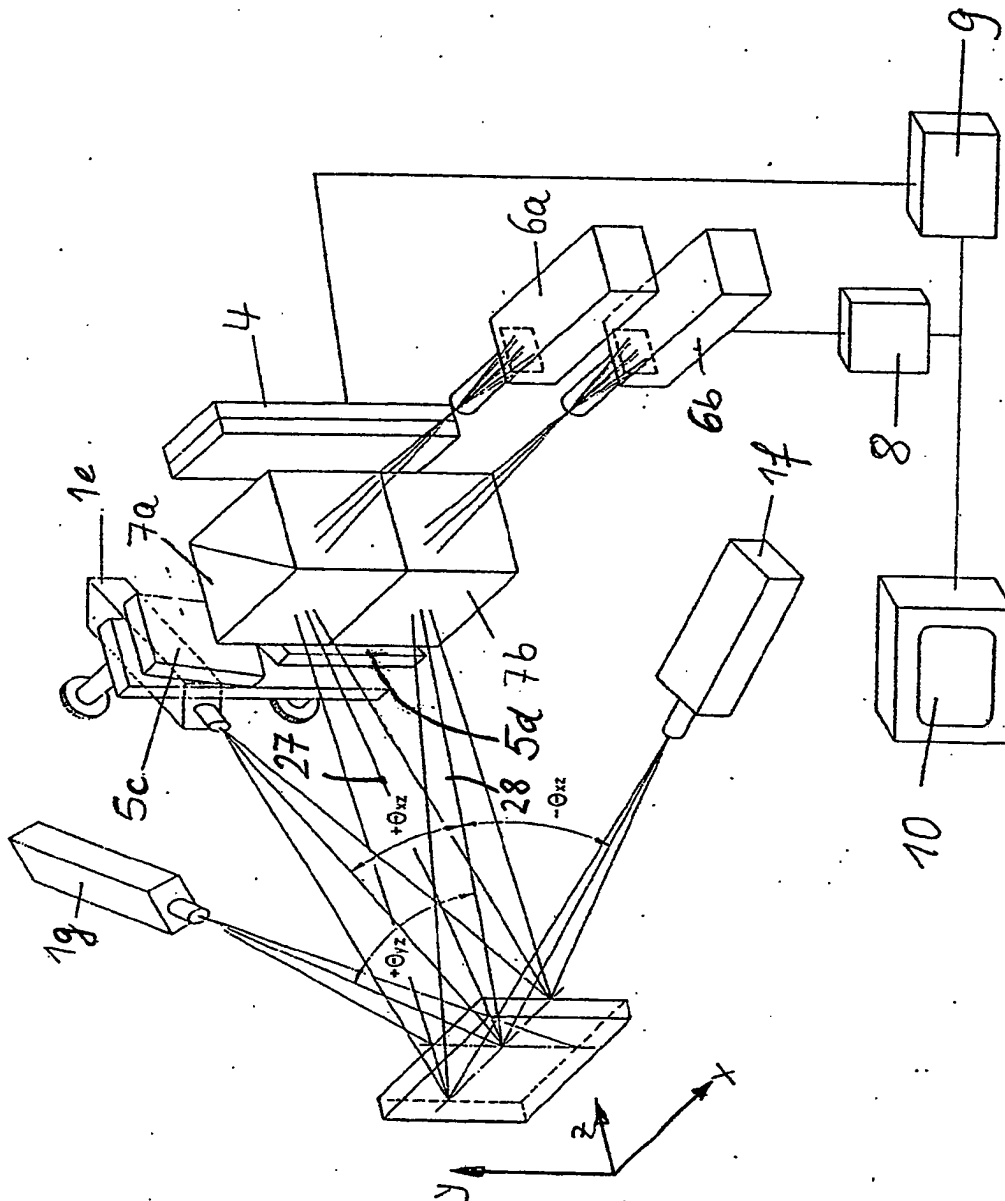


Fig. 11

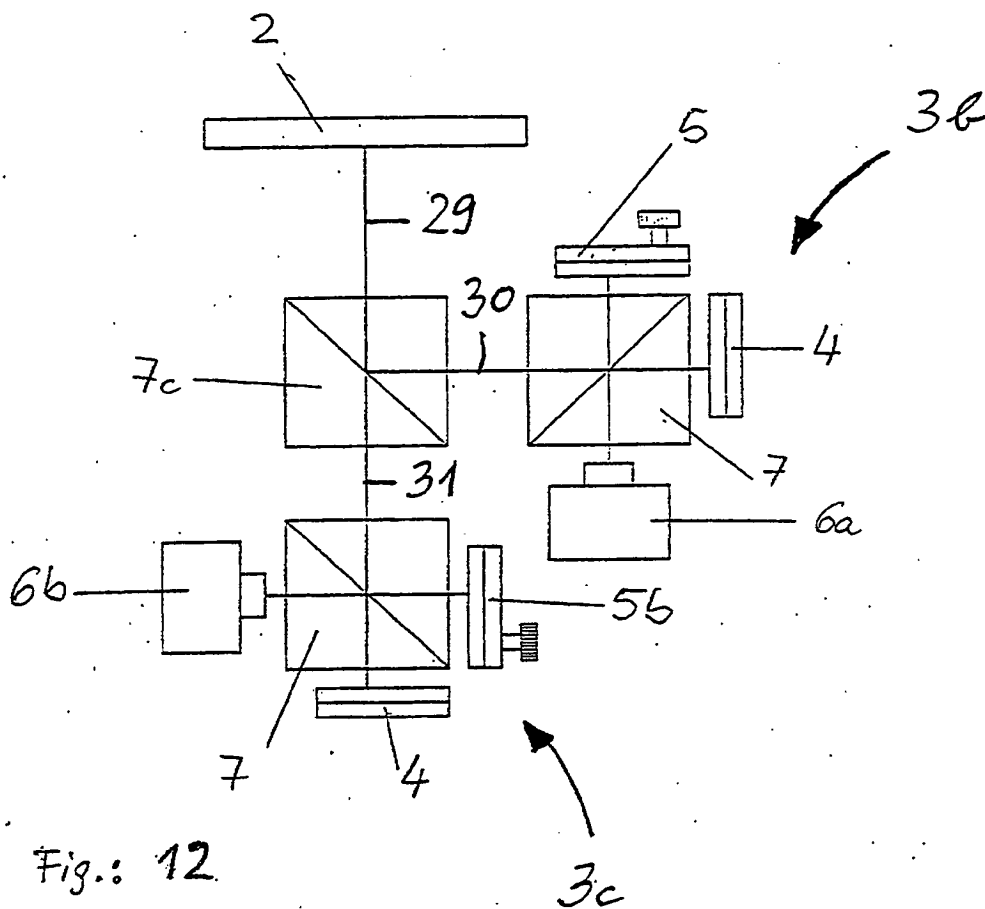


Fig.: 12